

# 実空間及びVR空間での空中像インタラクションの比較

林 竜吾<sup>1,a)</sup> 小泉 直也<sup>1,b)</sup>

**概要:** 本研究では、VR空間での空中像インタラクションの設計を目的とし、空中像のVRシミュレーションの応用を検討する。実際の空中像、我々が開発したVR空間での空中像のシミュレーション、一般的なVRオブジェクトの、3つの条件下でインタラクションにおけるユーザーの振る舞いを比較した。提案手法で空中像の視域を再現し、その効果を、空中像の観察位置で評価した。また、空中像とのタッチインタラクションにおいて、空中に浮かぶ映像の位置とユーザーの指の動きを比較したところ、実際の空中像装置では分散がVR環境の2条件に比べて大きくなった。さらに、我々の提案した遮蔽矛盾を再現したシミュレーションは、実際の装置でのインタラクションとの間に大きな誤差が生じた。

## 1. はじめに

エンタテインメントシステムを実空間で運用する前に、CGを活用した3Dシミュレーションによる設計・検証が行われている[1]。ライブパフォーマンスや大規模なシステムでは、多くの場合、本番環境でテストできる機会が限られている。そのため、シミュレーションを用いたシステムの設計や演出の検証が重要である。

本研究ではエンタテインメントシステムに活用できる技術として空中像に着目した。空中像は何もない空中に結像した映像であり、裸眼で観察でき、デバイスの装着や把持を必要としない。そのため、ヘッドマウントディスプレイ(HMD)やハンドヘルドデバイスに依存する映像の表示手法とは異なる。また、空中像はセンシング技術と組み合わせることで、実物体やユーザーの手と直接インタラクションできる。

これまでに、空中像インタラクションがVR空間でどこまで再現できるかは明らかになっていない。VR空間で空中像インタラクションを再現できれば、設計や検証の効率が向上する。しかし、VR空間における空中像インタラクションを実際の空中像と比較し、評価した研究はない。

本研究ではVR空間での空中像インタラクションの設計を目的とし、VR空間での空中像インタラクションにおけるユーザーの振る舞いを調査する。実際の空中像、我々が開発したVR空間での空中像のシミュレーション、一般的なVRオブジェクトの、3つの条件下で実験参加者に同様のタスクを行ってもらい、その結果を比較する。

## 2. 関連研究

### 2.1 空中像光学系

空中像光学系は、光源から発せられた光が光学素子を通して反射、屈折、透過し、最終的に宙に浮いた像が形成される光学系である。空中像の生成には、MMAP, DCRA(Dihedral Corner Reflector Array)[2], Roof Mirror Array[3], Retro-reflective Mirror Array[4]などの光学素子が利用されている。また、再帰性反射材とハーフミラーを組み合わせた光学系、AIRR(Airial Image by Retro-Reflective)[5]も空中像を結像する。

本研究では、MMAPによって生成された空中像を対象とする。その理由は、後述する我々のシミュレーション手法が本研究の調査に適しているためである。MMAPは単体で空中像を生成できるため、光学系の構成が簡素になる利点もある。さらに、AIRRと比較して、光源に対する空中像の輝度減衰率が低い。

### 2.2 空中像インタラクション

空中像インタラクションの設計では、空中像の視域を考慮する必要がある。たとえば、MRsionCase[6]は、展示物を取り囲むように空中像を生成する。このような、広い範囲からの観察や、複数の視聴者による同時鑑賞に対応する空中像デバイスを設計するうえで、視域の把握は不可欠である。さらに、視覚情報が空中像として提示される場合、輝度や鮮明度の確保も重要である。

空中像と実物体の間に固有の、遮蔽矛盾の考慮も重要である。MARIO[7], Scoopirit[8], AIR-range[9]などのアプリケーションが提案されているが、いずれも実オブジェク

<sup>1</sup> 電気通信大学

<sup>a)</sup> hayashi@media.lab.uec.ac.jp

<sup>b)</sup> koizumi.naoya@uec.ac.jp

トの近くに空中像を配置するため、遮蔽矛盾を考慮した綿密な設計が必要である。MARIO はユーザーが構築したブロックの上を空中像が移動することで、Scoopirit は水上で空中像をすくい上げることで、AIR-range は卓上の実物に隣接して安定した輝度で空中像を表示することで、ユーザーと空中像のインタラクションを実現している。これらのアプリケーションは、空中像が実物体に近接するため、設計で遮蔽矛盾に対処する必要がある。

また、迷光も空中像インタラクションの設計において対処すべき点のひとつである。迷光は空中像とともに発生する不要な光であり、空中像の観察を妨げる可能性があるため、その位置を把握することが重要である。しかし、観察者の視点位置や装置の設計により迷光の位置は変わるため、位置の把握が困難である。そこで、迷光を除去するためのさまざまな手法が提案されている。Hiratani らは迷光となる光を遮断するために、光学素子にマスクを取り付けることを提案した [10]。Zhang らは迷光を除去するために、ディスプレイにフィルターを取り付ける方法を考案した [11]。さらに、一部の研究ではプリズム [12] やレンズ [13] を光学システムに組み込んで迷光を排除している。

本研究では、これらの考慮すべき要素のうち、視域や遮蔽矛盾に焦点を当てた。これらは光学素子に依存しない、空中像に一般的な特性要素であり、空中像インタラクションの設計において考慮が重要なためである。一方で、輝度や鮮明度、迷光は、本研究の対象外とした。輝度や鮮明度は HMD 内部の光学系に影響を受け、忠実な再現が困難なためである。また、迷光は除去する手法が多く提案されているため、本研究では考慮しない。

## 2.3 シミュレーション方法

空中像のシミュレーションには、様々な手法が提案されている。Otao らは、光線の軌跡を描画し、空中結像が観察できる位置や光線の経路を可視化した [14]。Maekawa らは、光学素子における光の透過率をヒートマップで表現し、空中像や迷光の視域をシミュレーションした [2]。しかし、これらの方法では、実際の空中像の様子を再現できない。

レイトレーシングにより空中像を忠実に再現するシミュレーション手法も提案されている。木内らは、光線の軌跡を追跡するレンダーリング手法であるレイトレーシングを用いた MMAP のシミュレーション手法を発表した [15]。この手法では、MMAP を綿密にモデル化し、物理現象に従って光線の経路をシミュレーションすることで、空中像や迷光の見え方を忠実に再現することに成功している。また、星らは、レイトレーシングを利用したシミュレーションにより、空中映像の視域を把握する手法を提案している [16]。しかし、多くの場合、レイトレーシングはレンダーリングに時間がかかる。そのため、リアルタイムな描画更新が求められる HMD 上での動作には適さず、空中像インタラク

ションの設計に応用するのが困難である。

これまでに我々は、VR 空間で空中像をシミュレーションする手法を提案している [17]。この手法はゲームエンジンを用いており、リアルタイムに空中像をシミュレーションできる。また、本研究の対象である、空中像の視域や遮蔽矛盾が再現されている。そのため、実際の空中像の比較対象として、この手法により再現された空中像を利用する。

## 3. 実験

VR 空間における空中像インタラクションの調査を 2 つ行った。実験 1 では、空中像の視域が影響するインタラクションとして、ユーザーの観察位置を調査した。実験 2 では、遮蔽矛盾が影響する、空中像とのタッチインタラクションについて調査した。

いずれの実験も、実際の空中像 (図 1(a))、VR 空間での空中像シミュレーション (図 1(b))、一般的な VR オブジェクト (図 1(c)) の 3 つの条件で行った (実空間での条件が 1 条件、VR 空間での条件が 2 条件の計 3 条件)。空中像シミュレーションの条件では、視域や遮蔽矛盾といった空中像の特性が再現される、我々の手法によるシミュレーションを用いた。一般的な VR オブジェクトの条件は、視域や遮蔽矛盾が再現されない条件として用意された。

実験参加者は 21 歳から 24 歳の成人 12 名であった。全ての参加者が 2 つの実験に連続して参加し、全ての条件を行った。参加者ごとに実験や条件の順序についてカウンターバランスをとり、順序効果を相殺した。

### 3.1 実験システム

実験に用いた空中像装置の概要を図 2 に示す。VR 空間における 2 つの条件では、Unity で同じ設計の装置を実装して空中像を提示した。空中像の光源には PC に接続した外部ディスプレイを利用し、図 3 の映像を表示した。ボタンの大きさは、Bermejo らの実験設計 [18] を参考に作成された。空中像の飛び出し距離は 48 cm とした。実験において迷光が気にならないように、空中像の飛び出し距離を大きく取り、ディスプレイの表面にルーバーフィルムを貼り付けることで迷光を低減した。

参加者の視点位置や手の位置は、光学式モーショントラッキングシステム OptiTrack(PrimeX 13) を用いて測定した。また、現実条件で空中像の位置を把握するために MMAP の位置もトラッキングした。OptiTrack でのトラッキング結果は Unity 上での位置情報として利用された。

HMD には VIVE Pro Eye を用いた (図 4(a))。HMD の位置は SteamVR でトラッキングした。ここで、Unity 内でのワールド空間の原点と OptiTrack のトラッキングにおける座標空間の原点を一致させた。また、この HMD には瞳孔間距離 (Interpupillary distance: IPD) の調整機能があり、参加者ははじめて HMD を被る際に自ら IPD を調整し

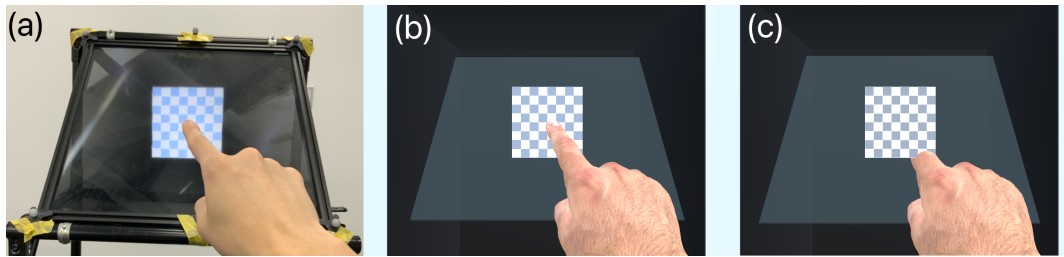


図 1 実験条件: (a) 実際の空中像; (b) VR 空間での空中像シミュレーション; (c) 一般的な VR オブジェクト

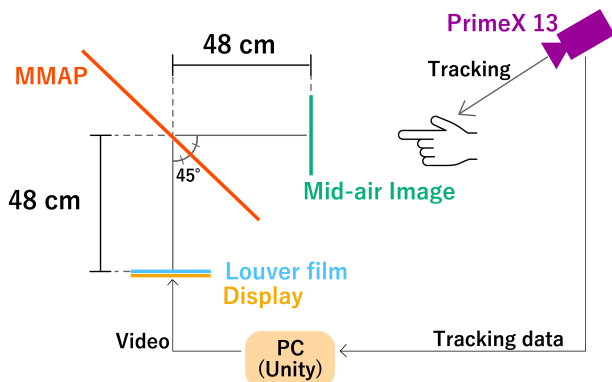


図 2 実験システムの概要

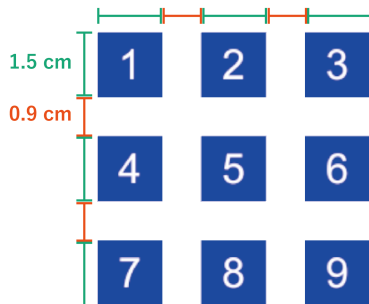


図 3 実験に使用した空中像ボタン

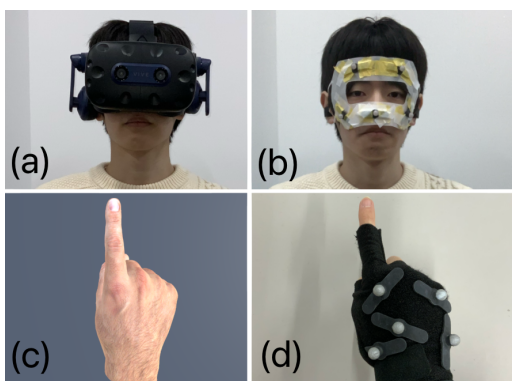


図 4 参加者の装着したデバイス: (a) HMD; (b) アイマスク; (c) 手のモデル; (d) グローブ

た. この IPD は, Unity 内で視点となるカメラの位置に反映された.

### 3.2 実験 1: 観察範囲の調査

#### 3.2.1 実験設計

この実験の目的は, ユーザーが空中像を観察する範囲の調査である. 空中像の視域は限られており, 観察者の位置によっては空中像が見えない. この特性を再現し, ユーザーの観察範囲に同様の傾向が見られるかを調査した.

参加者は空中像の周りを自由に動ける状態で, 空中像を観察した. 実験は各条件ごとに 1 試行, 計 3 試行を実施した. 1 試行あたりの手順は以下の通りである.

- (1) 参加者は空中像がよく見える位置まで移動し, 位置についてことを実験者に申告する
- (2) 参加者は実験者から止められるまで (1 分間), 自由に空中像を観察する

この実験では参加者の視点位置を測定した. 実際の空中像の条件において参加者はマーカー付きのアイマスク (図 4(b)) を装着し, これを視点位置として測定した. VR 空間の 2 条件では HMD の位置を視点位置として測定した. これらの視点位置は手順 2 の間, Unity 上で毎フレーム記録された.

実験中の姿勢について制限はなく, 自由に移動して良いことを参加者へ事前に説明した.

#### 3.2.2 分析

測定された参加者の観察位置は, 空中像に対する方位角に変換して分析した. これは空中像を観察できる距離に制限はないが, 角度には制限があるためである. 仰角方向についても制限があるが, 参加者によって身長が異なるため, 高さは考慮しないこととした.

空中像の正面を 0 度とし, 空中像に対して右側に移動すると正の角度, 左側に移動すると負の角度とした (図 5). この角度は, 参加者の視点位置と空中像の位置から計算された. 実際の空中像条件における空中像の位置は, MMAP の位置と空中像の飛び出し距離から求めた. VR 空間の 2 条件における空中像の位置は, Unity 上での空中像の位置から求めた.

### 3.3 実験 2: 貫通量の調査

#### 3.3.1 実験設計

この実験の目的は, 空中像のタッチインタラクションに

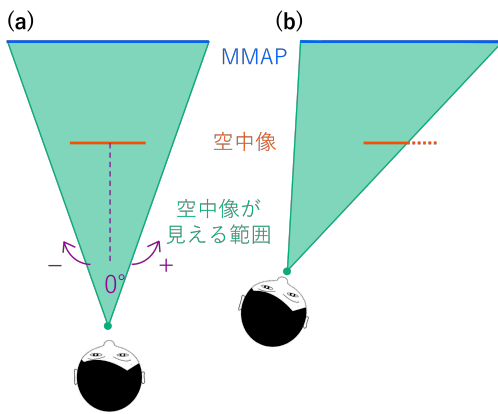


図 5 視域の概要図: (a) 空中像の正面を 0 度、右側に移動すると正の角度、左側に移動すると負の角度とした; (b) 視点が正面から離れると空中像の一部が見切れる (点線部分)

における貫通量の調査である。ユーザーは空中像に触れるとき、実際の結像位置よりも奥まで指を動かすことが知られている [18]。我々はこれが遮蔽矛盾によるものであると考え、この特性を再現することで、空中像に対する貫通量が VR 空間でも同様に生じるかを調査した。

参加者は 9 つの空中像ボタンのうち、赤いボタンを指先でタッチした。実験は各条件ごとに 36 試行、計 108 試行である。各条件の 36 試行は連続して行った。全ての条件のあと、実験者は参加者の指の長さを測定し、参加者は実験について自由にコメントした。1 試行あたりの手順は以下の通りである。

- (1) 参加者は空中像ボタンにタッチしやすいと判断した位置に着席し、実験の説明を受ける。
- (2) ボタンがひとつ赤くなり、参加者はそのボタンにタッチする。
- (3) 参加者はボタンに触れたと感じた瞬間に「ピッ」と言い、指をボタンから離す
- (4) 実験者は参加者の発言に合わせて赤くなるボタンを変更する

手順 2 で赤くなるボタンの順番は乱数によって生成されたが、同じボタンが連続してターゲットにならないように調整された。また、手順 3 で参加者に発声させた理由は、参加者が空中像に触れたと感じたタイミングを把握するためである。予備実験において、実験開始時の位置ですでに空中像より奥に指を置いている人がおり、実際の結像位置で衝突判定が行えなかったため、参加者の申告により判定した。

この実験では参加者の手の位置と、タッチにかかる時間を測定した。参加者はマーカー付きのグローブ (図 4(d)) を装着し、これを手の位置として測定した。タッチにかかる時間は、手順 2 でボタンが赤く光ってから、手順 3 で参加者が発声するまでの時間として測定された。測定中の手の位置は Unity 上で毎フレーム記録され、タッチにかかる

時間は Unity 内での経過時間をもとに計算された。

全ての参加者は右手の人差し指で空中像ボタンに触れた。実際の空中像の条件では参加者の手で、VR 空間の 2 条件では参加者の手に合わせて動く手のモデルで空中像に触れた。実験の最中、参加者は人差し指を立てた手の姿勢を保つよう指示された。VR 条件の手のモデルも同様の姿勢で固定された (図 4(c))。

実験の間、参加者は常に着席していた。椅子にはキャスターと高さを調節する機能がついており、参加者は自由に調整できた。参加者は各条件の開始時に、空中像ボタンにタッチしやすいと判断した位置まで、キャスターで椅子を移動した。椅子の位置の調整が終わったことを確認してから、実験者は実験を開始した。

### 3.3.2 分析

各条件の 36 試行のうち、最初の 10 試行はユーザーがタスクに慣れるための時間と見なし、分析においては排除した。測定した指の長さや手の位置から指先の位置から、空中像に対する貫通量を求めた。各試行について、測定された全てのフレームのデータから貫通量を計算し、それらの最大値を分析に用いた。タッチにかかる時間は、各条件の最初の 10 試行を除いた 26 試行についてのみ分析に用いた。最大貫通量と時間のそれぞれについて、ウィルコクソンの符号順位検定により多重比較をし、全ての条件の組み合わせについて有意差があるかを調査した。p 値の補正にはボンフェローニ補正を用いた。

## 4. 結果

### 4.1 実験 1: 観察範囲の調査

図 6 は、実験 1 で測定された空中像を観察する角度のバイオリンプロットである。このバイオリンプロットでは全参加者のデータが条件別にまとめられている。縦軸は空中像に対する方位角である。実際の空中像やシミュレーションでの視界範囲は緑色で示されている。一方、一般的な VR オブジェクトの条件では、視界が制限されず、任意の角度から観察が可能であった。身長の違いを考慮せず、高さは除外している。

この結果から、実際の空中像やシミュレーションでは、参加者が視界内で観察する傾向があった。実際の空中像の条件で 99.4 %、シミュレーション条件では 85.5 % のデータが視域内にあった。一方で、一般的な VR オブジェクト条件では、観察範囲が広がり、視域内のデータは 64.8 % に留まった。また、この条件では背面側 ( $\pm 180$  度) からの観察も確認された。

### 4.2 実験 2: 貫通量の調査

実験 2 で測定された最大貫通量の箱ひげ図を図 7 に示す。実際の空中像やシミュレーション条件では、一般的な VR 空間オブジェクトの条件と比較して貫通量が大きかつ

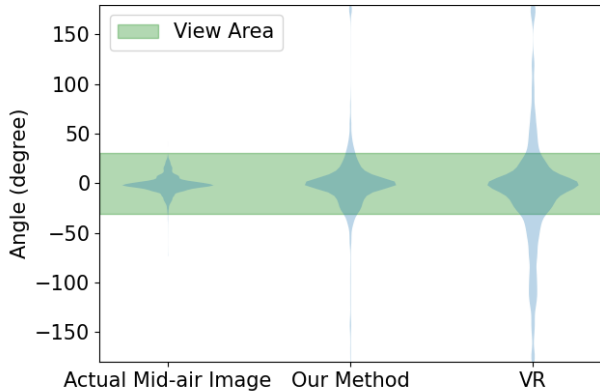


図 6 空中像を観察する角度の分布: 実際の空中像の条件では 99.4 %, シミュレーション条件では 85.5 %, 一般的な VR オブジェクトの条件では 64.8 % のデータが視域内にあった

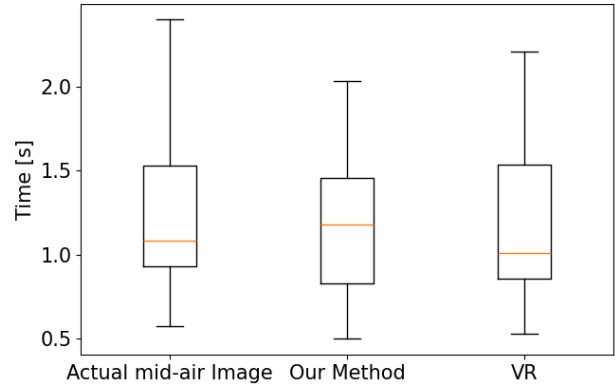


図 8 タッチにかかる時間

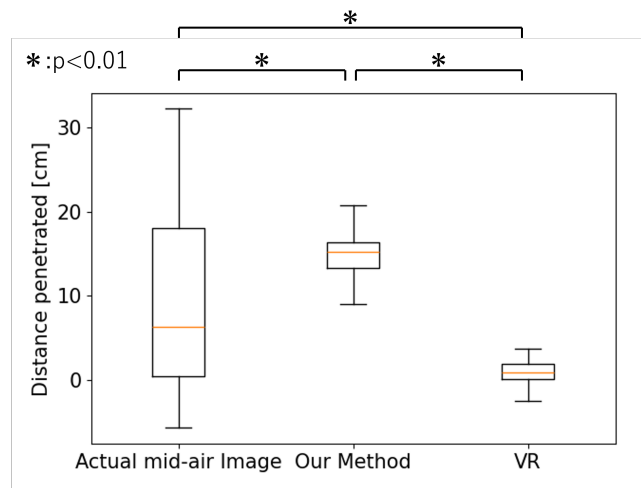


図 7 空中像に対する最大貫通量

た. 具体的には, 実際の空中像の条件で 0.97 cm, シミュレーション条件では 15.24 cm, VR オブジェクトの条件では 6.31 cm であった. また, ウィルコクソンの符号順位検定による多重比較の結果, どの組み合わせについても有意な差が見られた ( $p < 0.01$ ).

一方で, 図 8 によって示される, タッチにかかる時間はいずれの条件においても有意な差はみられなかった ( $p > 0.05$ ). 中央値は, 実際の空中像の条件で 1.08 秒, シミュレーション条件では 1.18 秒, VR オブジェクトの条件では 1.54 秒であった.

インタビュー結果によると, ほとんどの参加者は実際の空中像やシミュレーション条件において, 遮蔽矛盾が生じていることに気づいていなかった. 一方で, 一般的な VR オブジェクトの条件で空中像貫通時に指先が遮蔽されることに気づいている参加者が複数見られた. ある参加者は, 一般的な VR オブジェクトの条件では指先が遮蔽されるので, ほかの条件よりも誤差が大きかったように感じたと言

べた. また, 空中像があると感じる位置に指先を置くと, 空中像と指先の両方を同時に焦点を合わせることが難しいとのコメントもあった.

## 5. 考察

### 5.1 実験 1: 観察範囲の調査

空中像の視域を再現することで, ユーザーが自主的に空中像を観察する範囲が実際の空中像での観察範囲に近づくことが確認できた. 図 6 に示すように, 空中像の視域を再現したシミュレーション条件の結果と一般的な VR オブジェクト条件の結果を比較すると, シミュレーション条件の方が分布の広がり実際の空中像の条件に近い. この結果から, 一般的な VR オブジェクトは, どこからでも観察できる点が空中像の再現として致命的であり, 空中像インタラクションの設計・検証には適さないと言える.

視域が再現される空中像のシミュレーション条件と, 実際の空中像装置の条件の間にも差が生じた. この原因として, 実空間と VR 空間で参加者の行動意欲に差のある可能性がある. 実空間と VR 空間でユーザーの行動を比較した Ville らの研究では, VR 空間では参加者は一般的に VR の方が活発に動くことが報告されている [19]. シミュレーション条件では実際の空中像の条件よりも, 視点が視域外でトラッキングされた割合が大きくなっている. これは VR 空間での行動意欲が高まることと関係している可能性がある.

### 5.2 実験 2: 貫通量の調査

空中像をタッチする際の指先の貫通量について, 実際の空中像で測定された分散が VR 条件の 2 条件と比べて大きくなった. この原因として, 空中像のぼけの有無が考えられる. 実際の空中像は光源に対してぼけた見た目になる. しかし, 本研究で空中像のぼけは焦点としていないため, 本実験において VR 環境の 2 条件では空中像がぼけていなかった. 実際の空中像の条件では, ぼけにより目の焦点が

比較的合わせづらく、奥行き知覚に影響した可能性がある。

我々の提案するシミュレーションの条件と、一般的なVRオブジェクトの条件の間の差の原因は、遮蔽矛盾の有無だと考えられる。実験後のコメントから、参加者は指先が遮蔽されることで、貫通したことを把握する手がかりにしていることが示唆された。シミュレーションの条件では遮蔽矛盾が再現されており、この手がかりが得られないため、最大貫通量が大きくなったと考えられる。

実際の空中像と我々の提案するシミュレーション条件はどちらも遮蔽矛盾を生じるが、これらの条件間で最大貫通量の中央値に差が見られた。この原因は人間の眼の調節機能にあると考えられる。人間の眼がピントを合わせられる範囲には限界があるため [20]、貫通量が増加し指先と空中像の奥行き差が大きくなると、これらに対して同時に焦点を合わせられなくなる。実際の空中像条件ではこの現象が指先の貫通量を抑制した可能性がある。一方で、HMDを用いた場合には物体の奥行きにかかわらず焦点が一定であるため、常に指先と空中像に対して同時に焦点を合わせられる。そのため、シミュレーション条件では貫通に気付きにくく、最大貫通量の中央値が大きくなったと考えられる。これは固定焦点ディスプレイのHMDを用いてシミュレーションする際の課題と言える。

条件間で最大貫通量に有意差が認められた一方で、タッチにかかる時間については有意な差が見られなかった。参加者が自由に座る位置を調整できたことから、最大貫通量が大きい条件ほど参加者はより空中像の近くでインタラクティブしていた可能性がある。したがって、空中像とのタッチインタラクティブをシミュレーションで設計・検証する際には、貫通量の差に加えて、ユーザーがインタラクティブしやすい位置にも差が生じうることを考慮する必要があると考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、実際の空中像、我々が開発したVR空間での空中像のシミュレーション、一般的なVRオブジェクトの、3つの条件下でインタラクティブにおけるユーザーの振る舞いを比較した。その結果、シミュレーション上で空中像の視域を再現することで、ユーザーが自主的に空中像を観察する範囲が実際の空中像での観察範囲に近づくことが確認できた。空中像をタッチする際の指先の貫通量について、実際の空中像の条件ではVR環境の2条件よりも分散が大きくなった。さらに、我々の提案した遮蔽矛盾を再現したシミュレーションは、実際の装置でのインタラクティブとの間に大きな誤差を生じ、さらなる改善の余地が示唆された。

**謝辞** 本研究はJST創発的研究支援事業JPMJFR216Lの助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] 真鍋大度, 花井裕也: AR/VR技術によるライブ映像演出, 電子情報通信学会誌, Vol. 103, No. 6, pp. 564–570 (2020).
- [2] Maekawa, S., Nitta, K. and Matoba, O.: Transmissive optical imaging device with micromirror array, *Three-Dimensional TV, Video, and Display V* (Javidi, B., Okano, F. and Son, J.-Y., eds.), Vol. 6392, International Society for Optics and Photonics, SPIE, pp. 130–137 (online), DOI: 10.1117/12.690574 (2006).
- [3] Maeda, Y., Miyazaki, D. and Maekawa, S.: Aerial imaging display based on a heterogeneous imaging system consisting of roof mirror arrays, *2014 IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pp. 211–215 (online), DOI: 10.1109/GCCE.2014.7031217 (2014).
- [4] Koike, T. and Onishi, Y.: Aerial 3D Imaging by Retroreflective Mirror Array, *Proceedings of the 2018 ACM Companion International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '18 Companion, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 25–29 (online), DOI: 10.1145/3280295.3281365 (2018).
- [5] Yamamoto, H., Tomiyama, Y. and Suyama, S.: Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection (AIRR), *Opt. Express*, Vol. 22, No. 22, pp. 26919–26924 (online), DOI: 10.1364/OE.22.026919 (2014).
- [6] Kim, H., Nagao, S., Maekawa, S. and Naemura, T.: [Paper] MRsionCase: A Glasses-free Mixed Reality Showcase for Surrounding Multiple Viewers, *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, Vol. 2, No. 3, pp. 200–208 (online), DOI: 10.3169/mta.2.200 (2014).
- [7] Kim, H., Takahashi, I., Yamamoto, H., Maekawa, S. and Naemura, T.: MARIO: Mid-air Augmented Reality Interaction with Objects, *Entertainment Computing*, Vol. 5, No. 4, pp. 233–241 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.entcom.2014.10.008> (2014).
- [8] Matsuura, Y. and Koizumi, N.: Scoopirit: A Method of Scooping Mid-Air Images on Water Surface, *Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 227–235 (online), DOI: 10.1145/3279778.3279796 (2018).
- [9] Kikuchi, T., Yahagi, Y., Fukushima, S., Sakaguchi, S. and Naemura, T.: [Paper] AIR-range: Designing optical systems to present a tall mid-AIR image with continuous luminance on and above a tabletop, *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, Vol. 11, No. 2, pp. 75–87 (online), DOI: 10.3169/mta.11.75 (2023).
- [10] Hiratani, K., Iwai, D., Kageyama, Y., Punpongsanon, P., Hiraki, T. and Sato, K.: Shadowless Projection Mapping using Retrotransmissive Optics, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 29, No. 5, pp. 2280–2290 (online), DOI: 10.1109/TVCG.2023.3247104 (2023).
- [11] Zhang, H.-L., Deng, H., Ren, H., Yang, X., Xing, Y., Li, D.-H. and Wang, Q.-H.: Method to eliminate pseudoscopic issue in an integral imaging 3D display by using a transmissive mirror device and light filter, *Opt. Lett.*, Vol. 45, No. 2, pp. 351–354 (online), DOI: 10.1364/OL.45.000351 (2020).
- [12] Osada, Y. and Bao, Y.: Design of ghost-free aerial display by using prism and dihedral corner reflector array, *Electronic Imaging*, Vol. 34, No. 17, pp. 237–1–237–1 (online), DOI: 10.2352/EI.2022.34.17.3DIA-237 (2022).

- [13] Choi, S., Park, S. and Min, S.-W.: Design of ghost-free floating 3D display with narrow thickness using off-set lens and dihedral corner reflector arrays, *Opt. Express*, Vol. 28, No. 10, pp. 15691–15705 (online), DOI: 10.1364/OE.392036 (2020).
- [14] Otao, K., Itoh, Y., Takazawa, K., Osone, H. and Ochiai, Y.: Air Mounted Eyepiece: Optical See-Through HMD Design with Aerial Optical Functions, *Proceedings of the 9th Augmented Human International Conference, AH '18*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3174910.3174911 (2018).
- [15] Kiuchi, S. and Koizumi, N.: Simulating the appearance of mid-air imaging with micro-mirror array plates, *Computers & Graphics*, Vol. 96, pp. 14–23 (2021).
- [16] Hoshi, A., Kiuchi, S. and Koizumi, N.: Simulation of mid-air images using combination of physically based rendering and image processing, *Optical Review*, Vol. 29, No. 2, pp. 106–117 (online), DOI: 10.1007/s10043-022-00729-0 (2022).
- [17] 林 竜吾, 齋藤 旭, 小泉直也: ゲームエンジンを用いた再帰透過光学素子における迷光の位置・変形の再現, 第 27 回バーチャルリアリティ学会大会, Vol. 2022, No. 3E1-5 (2022).
- [18] Bermejo, C., Lee, L. H., Chojecki, P., Przewozny, D. and Hui, P.: Exploring button designs for mid-air interaction in virtual reality: A hexa-metric evaluation of key representations and multi-modal cues, *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, Vol. 5, No. EICS, pp. 1–26 (2021).
- [19] Mäkelä, V., Radiah, R., Alsherif, S., Khamis, M., Xiao, C., Borchert, L., Schmidt, A. and Alt, F.: Virtual Field Studies: Conducting Studies on Public Displays in Virtual Reality, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '20*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–15 (online), DOI: 10.1145/3313831.3376796 (2020).
- [20] 内川恵二, 篠森敬三: 視覚 I — 視覚系の構造と初期機能 —, 朝倉書店 (2007).